

Совет по морским млекопитающим (Россия)
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Россия)
«Черноморский совет по морским млекопитающим»
Одесский центр ЮгНИРО (Украина)
Государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского (Украина) Одесский
национальный университет имени И. И. Мечникова (Украина)
ФГУ «Межведомственная ихтиологическая комиссия» (Россия)
Одесский филиал Института биологии южных морей Национальной академии наук Украины
Украинское отделение Международной академии наук
Экологии, Безопасности Человека и Природы

МОРСКИЕ МЛЕКОПИТАЮЩИЕ ГОЛАРКТИКИ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

по материалам Пятой Международной конференции

*Одесса, Украина
14-18 октября 2008 г.*



Marine Mammal Council (Russia)
P. P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS (Russia)
«The Black Sea Marine Mammal Council»
Odessa Center of the Southern Research Institute for Fishery and Oceanography (Ukraine)
Ushinskiy State Pedagogical University (Ukraine)
Mechnikov Odessa National University (Ukraine)
Interdepartmental Ichthyological Commission (Russia)
Odessa branch of the Research Institute for Southern Seas of National Academy of Sciences of Ukraine
Ukrainian Branch of International Academy of Sciences of Ecology, Security of People and Nature

MARINE MAMMALS OF THE HOLARCTIC

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

After the Fifth International Conference

Odessa, Ukraine
October 14-18, 2008

Ryabov V.A.

Properties of the dolphin's mandible horn

Karadag Nature Reserve, NAS of Ukraine, Feodosia, Ukraine

Ранее было высказано предположение о том, что нижняя челюсть дельфина представляет собой периферический отдел эхолокационного слуха (Рябов 2003, 2007), основные морфологические и акустические структуры которого показаны на рис. 1. Было также показано, что площадь поперечного сечения подбородочных каналов (ПК) и мандибулярного канала (МК) нижней челюсти плавно возрастают каудально (рис. 2). Учитывая также, что стенки ПК и МК акустически упругие, а ткани заполняющие каналы звукопрозрачны, каждый ПК и соответствующая часть МК (от внутреннего отверстия соответствующего ПК до каудального отверстия МК) вместе рассматриваются как акустический рупор. В некоторых случаях в качестве рупора рассматривается МК (рис. 1) от внутреннего отверстия ПК1 (цифрой обозначается номер ПК считая от кончика рострума) до каудального отверстия МК.

Цель настоящей работы расчет основных параметров и изучение свойств акустического рупора левой и правой половины нижней челюсти. Из теории рупора следует, что он эффективно работает на частотах выше критической, f_c . На частотах ниже критической активная составляющая сопротивления излучения рупора r_r стремится к 0, и сопротивление становится чисто реактивным. Практически для частот

$$f > 2,3 f_c, \quad (1)$$

активная составляющая сопротивления излучения рупора достигает 0,9 от максимального значения, и отражением от устья можно пренебречь. Другими словами критическая частота рупора это самая низкая частота начиная с которой рупор передает акустическую энергию.

Критическая частота рупора f_c определяется длиной окружности его устья (выходного отверстия), как $(C_m/\lambda_c) \geq 1$, где: C_m - длина окружности устья рупора, или круга равновеликого по площади устью другой формы; λ_c - длина волны критической частоты рупора. Практически выбирают

$$C_m = \lambda_c \quad \text{и} \quad f_c = c_0/\lambda_c \quad (2)$$

где: c_0 - скорость звука.

Критическую частоту катеноидального рупора можно также рассчитать исходя из скорости расширения рупора,

$$f_{c\beta} = (c_0\beta)/(2\pi), \quad (3)$$

Previously, it was suggested that the lower jaw of dolphin is a peripheral part of echo-location hearing (Рябов 2003, 2007), whose principal morphological and acoustic structures are shown in Fig. 1. It was also shown that the area of the cross-section of mental foramens (MF) and of mandibular canal (MC) of the lower jaw gradually increase caudally (Fig. 2). Taking into consideration that the walls of MF and MC are acoustically elastic and the tissues filling the canals are transparent for sound, each MF and a corresponding part of MC (from the inner opening of a corresponding MF to the caudal opening of MC) together are considered as an acoustic horn. In some cases, MC (Fig. 1) from the inner opening of MF1 (the digit designates the number of MF from the tip of rostrum) to the caudal opening of MC is considered to be a horn.

The present study is aimed at calculation of the principal parameters and investigation of main properties of the acoustic horn of the left and right half of the lower jaw. From the theory of horn it follows that it works efficiently at frequencies above the critical frequency, f_c . At frequencies below critical ones the active component of radiation resistance of the horn r_r tends to 0 and resistance becomes purely reactive. Actually, for frequencies

$$f > 2.3 f_c, \quad (1)$$

the active component of radiation resistance of the horn attains 0.9 of the maximum value and the reflection from the mouth may be neglected. In other words, the critical frequency of the horn is the lowermost frequency when the horn transfers acoustic energy.

The critical frequency of the horn f_c is defined by the length of its mouth circumference (caudal opening) as $(C_m/\lambda_c) \geq 1$, where: C_m is the length of the circumference of horn mouth or a circle equal in the area to the mouth of a different form; λ_c is the wavelength of the critical frequency of the horn. In practice, one selects

$$C_m = \lambda_c \quad \text{and} \quad f_c = c_0/\lambda_c \quad (2)$$

Where: c_0 is the velocity of sound.

The critical frequency of the catenoidal horn may also be calculated by the horn's flare rate,

$$f_{c\beta} = (c_0\beta)/(2\pi), \quad (3)$$

where: c_0 is the velocity of sound in the adipose strand of the lower jaw which may be assumed to be equal to the velocity of sound in water (1500 m/s); β is the

где: c_0 - скорость звука в жировом тяже нижней челюсти, которую примем равной скорости звука в воде (1500 м/с); β -показатель расширения поперечного сечения рупора, которое с расстоянием x от горла рупора изменяется по закону

$$S_x = S_0 (\cosh(\beta x))^2, \quad (4)$$

где: S_0 - площадь поперечного сечения горла рупора; S_x - площадь поперечного сечения рупора на расстоянии x от его горла.

Размеры акустического рупора левой и правой половины нижней челюсти практически одинаковы, поэтому расчет параметров акустического рупора выполнен с использованием модели катеноидального рупора, рис. 2 (аппроксимация конусом и катеноидой).

Для определения критической и нижней граничной частоты рупора воспользуемся соотношениями (1 и 2), откуда $f_c = 19,1$ кГц, следовательно, нижняя граничная частота рупора, определяемая размерами его устья, равна

$$f = 19,1 * 2,3 = 43,8 \text{ кГц.} \quad (5)$$

Из (1, 3 и 4), находим $\beta = 0,01085$ (1/мм)

$$f_c \beta = 2,58 \text{ кГц}$$

следовательно, нижняя граничная частота рупора, определяемая его формой (скоростью расширения рупора), равна

$$f_\beta = 2,58 * 2,3 = 5,92 \text{ кГц.} \quad (6)$$

Интересно, что катеноидальный рупор представляет собой разновидность экспоненциальных гиперболических рупоров и, для данной нижней граничной частоты, является самым коротким рупором этого семейства, т.е. он имеет максимальную скорость расширения поперечного сечения.

Рассмотрим функции, которые выполняет рупор нижней челюсти. Звуковая волна, падающая на нижнюю челюсть проходит по тканям ПК в МК, т.е. горло рупора. Следовательно, горло рупора играет роль «сумматора», где звуки переданные каждым ПК складываются с соответствующими амплитудами и временными задержками, после чего они распространяются вдоль МК (рупора) и излучаются выходным отверстием МК (устьем рупора) на слуховую кость, расположенную рядом с суставом нижней челюсти. Средой для передачи звука является жировой тяж, заполняющий у *Odontoceti* полость МК и достигающий латеральной стенки барабанной кости. В этом месте кость имеет минимальную толщину 0,3-0,4мм, и играет роль барабанной перепонки, передавая звуковые колебания на молоточек среднего уха (Norris 1968, Hemila et al. 1999). Рассматриваемый путь передачи эхо на среднее ухо (минуя наружные слуховые проходы) свидетельствует о том, что морфологические структуры нижней челюсти представляют собой составные части специализированного периферического отдела эхолокационного слуха. Об этом же свидетельствует последовательность акустических систем (морфологических структур), показанная на рис. 1, которая с точки зрения акустики, является оптимальной.

horn's flare rate, the horn cross-section with distance x from the horn mouth is being increased by the law

$$S_x = S_0 (\cosh(\beta x))^2, \quad (4)$$

Where: S_0 is the area of the cross-section of the horn mouth; S_x is the area of the cross-section of the horn at the distance x from its mouth.

The size of the acoustic horn of the left and right half are identical. Therefore, the calculation of parameters of the acoustic horn is made on the basis of the model of the catenoidal horn (Fig. 2) (approximation by a cone and catenoid).

For determination of the critical and lower boundary frequency of the horn, let us use the equations (1 and 2), from which $f_c = 19.1$ kHz, therefore, the lower boundary frequency of the horn determined by the size of its mouth is

$$f = 19.1 * 2.3 = 43.8 \text{ kHz.} \quad (5)$$

From (1, 3, and 4) we find $\beta = 0.01085$ (1/mm)

$$f_{c\beta} = 2.58 \text{ kHz}$$

therefore, the lower boundary frequency of the horn determined by its form (by horn flare rate) is

$$f_\beta = 2.58 * 2.3 = 5.92 \text{ kHz.} \quad (6)$$

It is interesting that the catenoidal horn is a variant of exponential hyperbolic horns and is, for this lower boundary frequency is the shortest horn of this family, i.e., it has the maximal rate of flaring of the cross-section.

Let us consider the functions performed by the horn of the lower jaw. The sound wave falling onto the lower jaw passes over tissues of MF into MC, i.e., horn throat. Therefore, the horn throat is a "sumimator" where the sounds transferred by each MF are summed up with the corresponding amplitudes and times delays and then are transferred along MC (horn) and emitted by the caudal opening of MC (horn mouth) onto the otic bone situated near the joint of the lower jaw. The medium for sound transference is an adipose band filling in *Odontoceti* the cavity of MC and reaching the lateral wall of the tympanic bone. In this place the bone has the minimal thickness 0.3-0.4 mm and plays a role of the tympanic membrane transferring the sound vibrations onto the malleus of the middle ear (Norris 1968, Hemila et al. 1999). The considered way of transference of the echo onto the middle ear (beyond external auditory meatus) indicates that the morphological structures of the lower jaw are the components of the specialized peripheral part of echo-location hearing. This is also confirmed by the consequence of the acoustic systems (morphological structures) shown in Fig. 1 which is optimal in the acoustic aspect.

It follows from the calculations that the area of the horn mouth efficiently emits the frequencies above the lower boundary frequency $f = 43.8$ kHz (5). This result is very interesting as it defined the lower boundary frequency of both the horn and TWA and consequently of the echo-

Из расчетов следует, что площадь устья рупора эффективно излучает частоты выше нижней граничной частоты $f = 43,8$ кГц (5). Этот результат представляет большой интерес, так как определяет нижнюю граничную частоту и рупора и АБВ и, следовательно, эхолокационного слуха дельфина близкой к 43,8 кГц. Полученный результат согласуется со значением нижней границы эхолокационного слуха (40-140 кГц) измеренной в эхолокационных экспериментах (Рябов 1991; Рябов и Заславский 1998). Следовательно, рупор играет роль фильтра верхних частот, так как передает на слуховую кость только частоты эхолокационного слуха и ослабляет частоты ниже 43,8 кГц. Этот факт указывает на то, что низкочастотные звуки и коммуникационные свисты передаются на среднее ухо другим (низкочастотным) путем, роль которого, по-видимому, могут играть наружные слуховые проходы (Айрапетьянц и др. 1973), либо жир, расположенный с наружи задней латеральной стенки нижней челюсти и соединяющийся вентрально с внутримандибулярным (Ketten 1997). Из этого следует, что низкочастотный путь, по-видимому, играет роль фильтра нижних частот, так как должен передавать на среднее ухо только низкие частоты и коммуникационные свисты, и существенно ослаблять частоты выше 30-40 кГц. Предположение о наличии двух подсистем слуха и соответствующих им путей звукопроводения согласуется с существенно меньшей направленностью слуха *Odontoceti* на частотах ниже 30 кГц, по сравнению с более высокой и весьма специфической направленностью высокочастотного слуха (Аи, Моор 1984, Рябов 2003, Popov et al. 2005 и др.).

Практически с целью уменьшения нелинейных искажений верхнюю частоту, передаваемую конечным рупором, принято выбирать не превышающей 4 октавы от нижней граничной частоты, а скорость расширения сечения должна быть медленной, так чтобы нижняя граничная частота определяемая формой рупора была существенно ниже таковой определяемой размерами его устья. Полоса частот эхолокационного слуха (40-140 кГц) несколько меньше двух октав, а форма рупора нижней челюсти задает нижнюю граничную частоту $f_{\beta} = 5,92$ кГц (6), что существенно ниже $f = 43,8$ кГц (5), т.о. параметры рупора нижней челюсти согласуются с практическими требованиями точности воспроизведения формы передаваемого эхосигнала.

Исходя из закона сохранения энергии, следует, что рупор не усиливает энергию эхо, в то же время известно, что рупор согласует сопротивление излучения излучателя (в горле рупора) с размерами во много раз меньше длины волны с волновым сопротивлением среды (в устье рупора). Следовательно, рупор нижней челюсти согласует сопротивление излучения каждого ПК (размеры которых на частоте 110 кГц приблизительно в 5 раз меньше длины волны) с волновым сопротивлением жирового тяжа и передает энергию звуковых волн эхо из окружающей среды на слуховую кость во всем диапазоне частот эхолокационного слуха, без искажений и отражений. Кроме того, рупор является трансформатором и преобразует акустическую энергию с высоким давлением и малой объемной колебательной скоростью в горле, в энергию с низким давлением и высокой объ-

location hearing of dolphin near 43.8 kHz. The obtained result agrees with the value of the lower boundary of the echo-location hearing (40-140 kHz) measure in the echo-location experiments (Рябов 1991; Рябов и Заславский 1998). Therefore, the horn plays a role of the highpass-filter as it transfers onto the otic bone only the frequencies of the echo-location hearing and decreased the frequencies below 43.8 kHz. This fact indicates that the low-frequency sounds and communicative whistles are transferred onto the middle ear by a different way (low-frequency way) performed probably by the external auditory meatus (Айрапетьянц и др. 1973), or by fat situated outside of the posterior lateral wall of the lower jaw and ventrally connected with the intramandibular one (Ketten 1997). It follows that the low-frequency way seems to play the role of the lowpass-filter as it has to transfer to the middle ear only the low frequencies and communicative whistles and significantly decrease the frequencies above 30-40 kHz. The assumption of the presence of two subsystems of peripheral hearing and of the corresponding ways of sound transfer agrees with the significantly lower directivity of hearing in *Odontoceti* at frequencies below 30 kHz in comparison with a higher and very specific directivity of the high-frequency hearing (Au, Moor 1984; Рябов 2003; Popov et al. 2005, etc.).

Actually, to reduce the non-linear sound distortion it is practiced to select the upper frequency transmitted by the finite horn as not exceeding 4 octaves from the lower boundary frequency and flaring of the cross-section should be slow so that the lower boundary frequency defined by the form of the horn would be significantly lower than that defined by the size of its mouth. The frequency band of the echo-location hearing (40-140 kHz) is somewhat less than two octaves and the form of the horn of the lower jaw define the lower boundary frequency $f_{\beta} = 5.92$ kHz (6) what is significantly lower than $f = 43.8$ kHz (5). Thus the parameters of the horn of the lower jaw agree with practical requirements of reproduction fidelity of the form of the transmitted echo signal.

With consideration of the energy conservation law, it follows that the horn does not amplify the echo energy. It is also known that the horn matches the radiation resistance of the radiator (in the horn throat) with dimensions by many times smaller than the wave length with the wave resistance of the medium (in the horn mouth). Consequently, the horn of the lower jaw matches the radiation resistance of each MF (whose size at the frequency 110 kHz are approximately by five times less than the wave length) with the wave resistance of the adipose band and transfers the energy of sound waves of echo from the medium onto the otic bone all over the range of frequencies of the echo-location hearing without distortions and reflections. In addition, the horn is a transformer and transforms the acoustic energy with a high pressure and low particles velocity in the throat into the energy with a low pressure and a high particles velocity in the mouth. In modeling of exponential horns it was shown that intensification of the particles velocity (and accordingly the decrease of sound pressure) in the horn

емной колебательной скоростью в устье. При моделировании экспоненциальных рупоров было показано, что усиление объемной колебательной скорости (и соответственно уменьшение звукового давления) в устье рупора по сравнению с горлом равно квадратному корню из (S_m/S_t) ; где S_m - площадь устья рупора, S_t - площадь горла рупора. Рассчитанные значения усиления колебательной скорости на выходе рупора правой (левой) половины нижней челюсти для эхо прошедшего через ПК1 - ПК4 (ПК1-ПК3) составили 8,3; 10,8; 11 и 18 (7,9; 10 и 10), соответственно. Следовательно, рупор МК компенсирует недостаток усиления колебательной скорости (~10 раз) показанный для модели среднего уха *Odontoceti* (Hemila et al. 1999).

Источник звука с объемной скоростью Q в горле рупора, имеющего угол раскрытия Ω , излучает звуковую мощность на единицу площади в $4\pi/\Omega$ раз большую мощности пульсирующей сферы, излучающей в неограниченное пространство. В связи с этим усилительные свойства (K) рупора нижней челюсти дельфина по сравнению с ненаправленным источником (монополюс), можно рассчитать как

$$K = 4\pi/\Omega, \quad (7)$$

где: Ω - телесный угол, $\Omega = S/r^2$, где: S - площадь устья рупора; r - длина рупора.

Рассчитанные значения K на выходе рупора правой (левой) половины нижней челюсти достигают 2148 (2148), 466 (575), 201 (273) и 11 раз для эхосигналов, входящих в МК через ПК1 (ПК1), ПК2 (ПК2), ПК3 (ПК3) и ПК4, соответственно, с учетом размеров поперечных сечений ПК и МК и отражений от скачков сечений. Эффективная длина рупора и следовательно его K уменьшается с удалением ПК от кончика роstrума. Рассчитанные значения K были использованы в качестве весовых коэффициентов при расчете амплитудных распределений АБВ и характеристики направленности эхолокационного слуха (Рябов 2003).

И самое важное, что во всем диапазоне частот эхолокационного слуха рупор обеспечивает режим «бегущей волны» в МК, так как отражения от его устья в направлении горла (т.е. НРВЛЗ) исходя из свойств рупора, незначительны. Это очень важный вывод, так как он определяет устройство «идеальной» созданной природой широкополосной АБВ, как комплекс, состоящий из НРВЛЗ и акустического рупора.

mouth in comparison with the throat equal to the square root of (S_m/S_t) ; where S_m is the cross-section area of horn mouth, S_t is the cross-section area of horn throat. The calculated values of amplification of particles velocity at the horn mouth of the right (left) half of the lower jaw for the echo passed through MF1-MF4 (MF1-MF3) were 8.3; 10.8; 11 and 18 (7.9; 10, and 10), respectively. Consequently, the horn of lower jaw compensates the particles velocity amplification lack (~ by 10 times) shown for the model of the middle ear of *Odontoceti* (Hemila et al. 1999).

The sound source with the volume velocity Q in the horn throat with the opening angle Ω emits the sound power per unit area by $4\pi/\Omega$ times higher than the power of the pulsing sphere emitting to the unlimited space. Therefore, the amplifying properties (K) of the horn of the lower jaw of dolphin in comparison of the nondirectional source (monopole) may be calculated as

$$K = 4\pi/\Omega, \quad (7)$$

Where: Ω is the solid angle, $\Omega = S/r^2$, where: S is the area of the horn mouth; r is the length of the horn.

The calculated values of K at the horn mouth of the right (left) half of the lower jaw attain 2148 (2148), 466 (575), 201 (273), and 11 times for echo signals entering MC through MF1 (MF1), MF2 (MF2), MF3 (MF3), and MF4, respectively, with consideration of the size of cross-sections of MF and MC and reflections from the jumps of cross-sections. The effective length of the horn (and thus its K) decreases with the distance of MF from tip of the rostrum. The calculated values were used as weight coefficients in the calculation of amplitude distributions of TWA and of characteristic of directivity of echo-location hearing (Рябов 2003).

Most importantly, in all over the range of frequencies of the echo-location hearing the horn provides the regimen of the "traveling wave" in MC as the reflections from its mouth towards the throat (i.e., NAWDL) are insignificant, considering the properties of the horn. This a very important conclusion as it defines the structure of the "ideal", nature-created broadband TWA as a complex consisting of NAWDL and of the acoustic horn.

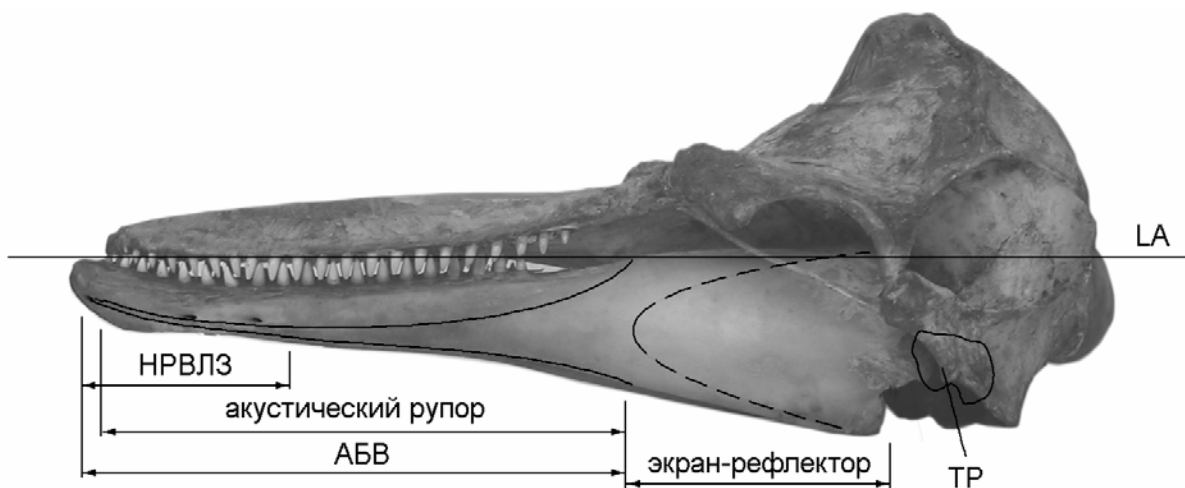


Рис. 1. Череп дельфина, латеральный вид, левая сторона. Сплошной линией показан профиль ПК1 и МК. Акустический рупор - часть МК от внутреннего отверстия ПК1 до экран-рефлектора, длина 246,5 мм. Горло рупора (у внутреннего отверстия ПК1) овальной формы с поперечными размерами 3,3х3,5 мм и площадью поперечного сечения около 9мм². Устье рупора плоское имеет форму вытянутого эллипса с осями 2а = 15мм и 2b = 44мм, с площадью поперечного сечения около 492 мм². НРВЛЗ - неэквидистантная решетка волноводных линий задержки расположена в горле акустического рупора, область нижней челюсти с ПК и передней частью МК, длина около 100мм. АБВ - антенна бегущей волны, комплекс, состоящий из НРВЛЗ и акустического рупора. Акустически не прозрачный экран-рефлектор - латеральная стенка заднего конца нижней челюсти, от устья рупора до сустава, около 132мм в длину (назально-каудально) с дорсально-вентральными размерами около 55мм и 88мм у устья рупора и у сустава, соответственно. ТР - барабанно-околоушная кость. LA - продольная ось животного.

Fig. 1. The skull of dolphin, left side. The continuous line shows the profile MF1 and MC. The acoustic horn is a part of MC from the inner opening of MF1 to the screen-reflector, length 246.5 mm. The throat of the horn (at the inner opening of MF1) is oval, with the transverse dimensions 3.3x3.5 mm and the area of cross-section about 9 mm². The horn mouth is flat, in the form of an elongated ellipsis with axes 2a = 15mm and 2b = 44 mm, with the area of the cross-section about 492 mm². NAWDL - non-equidistant array of waveguide delay lines is situated in the throat of the acoustic horn, the area of the lower jaw with MF and the anterior part of MC, length about 100 mm. TWA - the traveling wave antenna, a complex consisting of NAWDL and the acoustic horn. The acoustically transparent screen-reflector - the lateral wall of the posterior end of the lower jaw, from the horn mouth to the joint, about 132 mm in length (nasally-caudally) with dorso-ventral dimensions about 55 mm and 88 mm at the horn mouth, respectively. TP is the tympanoperiotic complex. LA is the longitudinal axis of the animal.

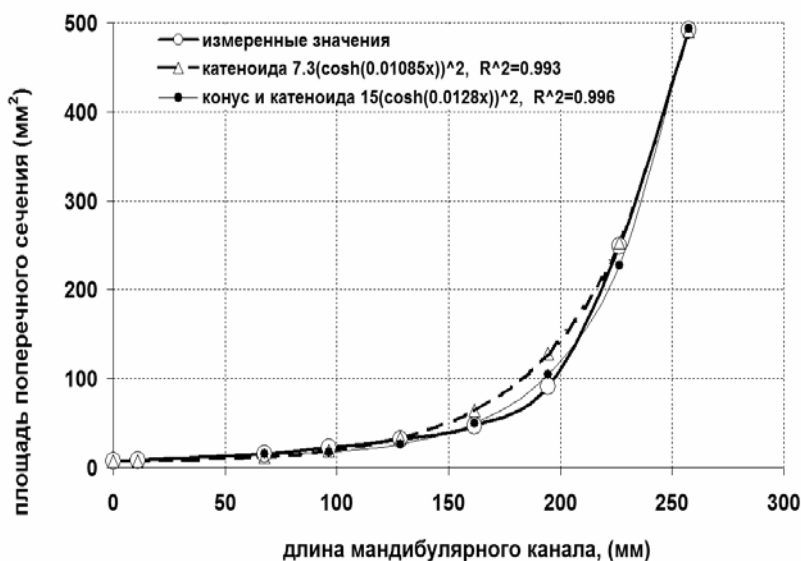


Рис. 2. Возрастание площади поперечного сечения мандибулярного канала (акустического рупора рис. 1) по его длине (длина ПК1 + длина МК, правая половина нижней челюсти).

Fig. 2. Increase in the area of the cross-section of the mandibular canal (acoustic horn, Fig. 1) along its length (length of MF1 + length of MC, the right half of the lower jaw).

Список использованных источников / References

- Айрапетьянц Э.Ш., Воронов В.А., Иваненко Ю.В., Иванов М.П., Орловский Д.Л., Попов В.В., Сергеев Б.Ф., Чилингирис В.И. К физиологии сонарной системы черноморских дельфинов. //Журн. эволюц. биохим. физиол. 1973. Вып 2. С. 418-421. [Airapetianz, E. Sch., Voronov, V.A., Ivanenko, U.V., Ivanov, M.P., Ordovsky, D.L., Popov, V.V., Sergeev, B.F., Chilingiris V.I. On the physiology of dolphin's sonar. //J. evol. biochim. physiol. 1973. 2. P 418-421.]
- Рябов В.А. Изучение морфологии нижней челюсти дельфина и моделирование характеристики направленности эхолокационного слуха. 2003 <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01mr01/367007592.pdf> [Ryabov V.A. 2003. Study of lower jaw morphology in dolphins and modeling of beam pattern of echolocation hearing].
- Рябов В.А. Спектрально - временной анализ акустических импульсных сигналов дельфином афалиной. Дисс. ... канд. биол. наук. СПб. 1991. 159 с. [Ryabov, V.A. 1991. Spectral-temporal analysis of acoustic impulse signals by bottlenose dolphins. Doctorate thesis. S. Petersburg. 159 p.]
- Рябов В.А., Заславский Г.Л. Помехозащищенность эхолокатора дельфина. Сенсорные системы. 1998. Т. 12, №2. С. 202-209. [Ryabov, V.A., Zaslavskiy, G.L. 1998. Noise immunity of dolphins' sonar. //Sensory systems. RAS. 12(2): 202-209]
- Au, W.W.L., Moor, P.W.B. Receiving beam patterns and directivity indices of the Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*. //J. Acoust. Soc. Am. 1984. 75, P. 255-262.
- Hemila, S., Nummela, S., Reuter, T. A model of the odontocete middle ear. //Her. Res. 1999. 133. P. 82-97.
- Ketten, D.R. Structure and function in whale ears. //Bioacoustics. 1997. V. 8. P. 103-135. Norris, K.S. The evolution of acoustic mechanisms in *Odontocete cetaceans*. // Evolution and Environment By ed. E. Drake. New Haven-Lond: Jail Univ. Press, 1968. P. 297-324.
- Popov, V.V., Supin, A.Ya., Klishin, V.O., Bulgakova, T.N. Monaural and binaural hearing directivity in the bottlenose dolphin: Evoked-potential study. //J. Acoust. Soc. Am. 2005. 75, P. 636-644.
- Ryabov, V. A. Mechanisms of a dolphin's echolocation hearing. // Fourth Int. Conf. on Bio-Acoustics, Loughborough University, UK./ Eds. S. Dible, P. Dobbins, J. Flint, E. Harland, P. Lepper. Proceedings of the Institute of Acoustics. 2007. V. 29. Pt. 3. P. 283-293.